Sonderdruck aus „DER FORST- UND HOLZWIRT", 40. Jahrgang, Heft Nr. 19, 10. Oktober 1985, Seiten 499–506
Verlag M. & H. Schaper, Grazer Straße 20, 3000 Hannover 81 – Druck: Dobler-Druck GmbH & Co KG, Alfeld (Leine)

Melioration saurer, devastierter Phyllitstandorte unter Kiefer im Bayer. Forstamt Waldsassen

Von F. Makeschin, S. Francke, K. E. Rehfuess und H. Rodenkirchen
unter Mitarbeit von U. Maier und J. Völkl

Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. W. LAATSCH zum 80. Geburtstag gewidmet

1. Problemstellung

Hohe Nährstoffexporte durch wiederholte Streunutzung und intensive Holzernte, der Reinanbau der Kiefer sowie Brandrodung und Waldweide minderten während der letzten Jahrhunderte auf großen Flächen die Fruchtbarkeit nordostbayerischer Waldböden. Der Stickstoff-, Phosphor- und Basenhaushalt erfuhr dabei eine entscheidende Verschlechterung, weil sowohl die Gesamtvorräte als auch die pflanzenverfügbaren Anteile dieser Nährelemente nachhaltig reduziert wurden (s. dazu REHFUESS, 1981).

Besonders gravierend waren die Auswirkungen dieser Nutzungseingriffe im Raum Waldsassen in der nördlichen Oberpfalz. Dort ist der Basenhaushalt der Böden noch durch zwei weitere Faktoren benachteiligt: Zum einen ist das Ausgangsgestein Phyllit bereits von seinen petrologischen Eigenschaften her zwar kaliumreich, jedoch sehr arm an Calcium und Magnesium. Zum anderen kommen z. T. sehr alte, d. h. durch lange Verwitterungsprozesse verarmte Böden vor. Neben den durch Streunutzung geminderten Vorräten an leicht verfügbaren Basen ist deshalb auch die Nachlieferung über die Silikatverwitterung (wahrscheinlich) gering. Die Böden sind gekennzeichnet durch Rohhumusauflagen, Reichtum an Oxiden (Hydroxiden) des Eisens und Aluminiums im B-Horizont, stark saure Bodenreaktion und deutliche, aber nur flache Podsolierung. An den Austauschern dominiert Aluminium, die Basensättigung liegt im Mineralboden um 5 %. Das Bodenleben ist stark beeinträchtigt. Pilzliche Zersetzung herrscht vor, unter den streuzersetzenden Bodentieren finden wir fast ausschließlich Vertreter der Mesofauna wie Milben, Collembolen und Nematoden. Leistungsfähige Großzersetzer fehlen weitgehend, vor allem die wühlende Makrofauna. Die Einarbeitung der Streu in den Mineralboden und ihr Abbau sind somit gering, der Auflagehumus ist scharf vom Mineralboden abgesetzt. Die artenarme Bodenvegetation setzt sich vorwiegend aus den für Rohhumusstandorte typischen Zwergsträuchern, säuretoleranten Moosen und Flechten zusammen. Auf diesen Böden stocken Kiefernwälder mit Ernährungsstörungen und geringer Wuchsleistung.

Bereits seit Jahrzehnten werden auf solchen Standorten z. T. sehr verschiedenartige Meliorationsverfahren eingesetzt. Sie zielen zum einen darauf ab, die Ernährungs-, Wuchs- und Verjüngungsbedingungen der Kiefernbestände zu verbessern. Sie sollen zum anderen die Voraussetzung schaffen für eine geplante Einbringung anspruchsvollerer Baumarten wie z. B. Fichte, Douglasie, Stieleiche, Winterlinde und Hainbuche. Nur bei nachhaltiger Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit sind diese waldbaulichen Ziele erreichbar. Entscheidend ist die Intensivierung des N-, P- und Basenumsatzes in Boden und Pflanzenbestand.

Eine intensive Erfolgskontrolle der in den letzten Jahrzehnten auf devastierten Phyllitstandorten praktizierten Sanierungsverfahren verdient auch in Zusammenhang mit der Diskussion über zunehmende Bodenversauerung durch atmogenen Säureeintrag und über geeignete Gegenmaßnahmen am Standort großes Interesse. Die lange Laufzeit solcher alten Meliorationsversuche verspricht genauere Informationen über die Langzeiteffekte der Eingriffe. Die Erfahrungen aus dem Waldsassener Phyllitgebiet dürften deshalb in der z. T. kontrovers geführten Diskussion über notwendige Vorbeugungs- und Meliorationsmaßnahmen in Waldökosystemen zur Versachlichung beitragen (vgl. SEIBT, 1977; PREUHSLER u. REHFUESS, 1982; HÜSER, 1983; ULRICH u. MATZNER, 1983; BEESE u. PRENZEL, 1984; GUSSONE, 1984; KENK et al., 1984; ERUZ et al., 1985; KRAMER u. ULRICH, 1985).

Wir berichten im folgenden über zwei Meliorationsexperimente in älteren Kiefernbeständen des Forstamts Waldsassen. Bei der Anlage dieser Versuche Anfang der 60er Jahre galt das Hauptaugenmerk dem N-Mangel, der nach den Untersuchungen von WEHRMANN (1959) als entscheidender Faktor für das schlechte Wuchsverhalten der Kiefern angesehen wurde. Darüber hinaus war die Bedeutung weiterer, u. U. durch mehrfache N-Düngung ins Minimum gelangender Nährelemente noch unzulänglich bekannt. Deshalb zielte man auch darauf ab, die vor allem in den biologisch inaktiven, organischen Rohhumusauflagen gespeicherten Nährstoffe durch meliorative Eingriffe zu aktivieren, entsprechend der Forderung von LAATSCH (1957) nach einer harmonischen Ernährung. Die Behandlungsvarianten der beiden Meliorationsversuche beinhalten daher neben mehrfacher N-Düngung bzw. biologischem N-Eintrag durch Lupinenunterbau auch eine P- und Basenzufuhr. Die Versuche werden seit ihrer Anlage ertragskundlich (Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München) und standorts- und ernährungskundlich (Lehrstuhl für Bodenkunde der Universität München und Bayerische Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt) untersucht. Erste Ergebnisse wurden u. a. bereits von KREUTZER (1967), KENNEL (1967), REHFUESS u. SCHMIDT (1971) und PREUHSLER u. REHFUESS (1982) publiziert. Die Versuchsflächen wurden in den Jahren 1982 bis 1984 intensiv bodenchemisch, vegetationskundlich sowie auf die Zusammensetzung der Bodenmakrofauna hin ausgewertet.

2. Versuchsanlage und Methodik

Die beiden Experimente liegen im Forstamt Waldsassen, Abt. 15 b, „Pfaffenwinkel", unmittelbar benachbart am Mittelhang (NW-exponiert, 5–9 % Inklination). Dieser Waldteil gehört zum Wuchsbezirk „Waldsassener Schiefergebiet". Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 6,9 °C, der durchschnittliche Jahresniederschlag 610 mm. Bodenform ist eine Podsol-Braunerde aus schluffig-lehmiger Phyllitfließerde über Phyllitzersatz. Die Höhe der Protonendeposition im Untersuchungsgebiet ist nicht bekannt. Messungen von HÜSER u. DUNKEL (1985) ergaben auf einem 15 km entfernten Standort (Altmugl) einen jährlichen Freilandeintrag von 0,21 kmol pro ha, allerdings bei deutlich höheren Jahresniederschlägen (785 mm). In Anbetracht der niedrigen Niederschläge im eigenen Untersuchungsgebiet Pfaffenwinkel dürfte die jährliche Protonendeposition in den Boden (trotz sicher höherer Einträge mit der Kronentraufe unter Kiefer) eine Größenordnung von 1 kmol/ha nicht wesentlich überschreiten.

Tab. 1 informiert über die durchgeführten Meliorationsmaßnahmen. Der Versuch WAL 228 wurde 1960 in einem damals 52jährigen Kiefernstangenholz (Bonität III.5 – IV.0), WAL 234 1964 in einem 86jährigen Kiefernbaumholz IV.6 Bonität angelegt. Durchforstungen zur Stammzahlgleichstellung erfolgten in beiden Versuchen 1979. Kontrollparzellen sind auf beiden Versuchsarealen vorhanden. WAL 228 umfaßt pro Variante 2 Parzellen mit je 0,15 ha, WAL 234 pro Variante 3 Parzellen mit je 0,12 ha. Die Versuche stehen unter Zaunschutz.

Für die bodenkundlichen Probenahmen wurden je Parzelle 20 Entnahmepunkte flächenrepräsentativ (Gitternetz) festgelegt. Die Beprobung erfolgte in der organischen Auflage getrennt nach Ol und Of+h mittels eines Stechrahmens (20 × 20 cm), im Mineralboden (bis 30 cm Tiefe) volumengerecht mit einem Spezialbohrer (∅ 5 cm) getrennt in 10-cm-Lagen. Jeweils 5 Einzelproben wurden zu insgesamt 4 Mischproben je Parzelle und Tiefenstufe vereinigt.

Die bodenchemischen Verfahren zur Analyse der Gesamtgehalte an Nährelementen und die statistischen Auswertungsmethoden sind bei ERUZ et al. (1985) dargestellt. Die Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK) und der prozentualen Anteile austauschbarer Kationen erfolgte nach ULRICH. Die Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und der 2:1-Wasserextrakt wurden modifiziert nach MEIWES et al. (1984) analysiert. Die bodenzoologische Methodik ist bei MAKESCHIN (1983) beschrieben. Zur vegetationskundlichen Methodik siehe RODENKIRCHEN (1982).

Tabelle 1: **Beschreibung der Meliorationsvarianten**

	Meliorationsversuch WAL 228		Meliorationsversuch WAL 234	
Versuchsglieder:	**KAS**	**KST**	**VOLL**	**LUP**
Anlagejahr:	1960		1964	
Bodenbearbeitung:	–	–	–	Fräsung (1964)
Düngung (pro ha):	15 dt Thomasphosphat (1960)		40 dt $CaCO_3$ (1964)	
	5 × 5 dt Kalkammonsalpeter	5 × 4,7 dt Kalkstickstoff	10 dt Thomasphosphat (1964)	
	(1960, 1962, 1964, 1966, 1975)		4 dt Patentkali (1964)	
	2 × 2 dt Patentkali (1966, 1975)		3 × 5 dt Kalkammonsalpeter (1964, 1966, 1972)	–
			3 dt Superphosphat (1967)	
Lupineneinsaat:	–	–	–	20 kg (1964)
Gedüngte Nährelementmengen insgesamt:				
kg/ha N	515	500	370	(Lupine)
P	105	105	95	95
K	83	83	90	90
Ca	815	1520	2095	1900
Mg	37	37	32	32

Erläuterungen:
KAS = Kalkammonsalpeter
KST = Kalkstickstoff
VOLL = Volldüngung
LUP = Lupine (+ Düngung)
KON = Kontrolle (0-Flächen)

3. Ergebnisse

3.1 Humusform und Bodenfauna

19–23 Jahre nach Versuchsanlage waren die biologisch inaktiven Rohhumusauflagen auf allen Meliorationsparzellen zu moderartigen Formen umgewandelt. Deren Zersetzungszustand ist deutlich verbessert, erkennbar an erhöhtem Feinhumusanteil von dunkler Färbung. Die Of+h-Lagen zeigen sich teilweise aufgelockert; eine biogene, makroskopisch erkennbare Vermischung mit dem Mineralboden war jedoch nicht festzustellen. Regenwürmer treten bei allen untersuchten Parzellen nur vereinzelt auf. Es finden sich ausschließlich säuretolerante auflageaktive Formen; Artenzusammensetzung und Besatzdichte waren durch die Meliorationsmaßnahmen nicht verändert. Deutlich gefördert sind beim Versuch WAL 234 streuzersetzende Diplopoden (Iuliden) und Tipulidenlarven, jedoch ohne klare Differenzierung zwischen den Varianten Volldüngung und Lupinenunterbau. Die meliorativen Eingriffe in WAL 228 bewirkten dagegen bei diesen beiden Gruppen bisher keine Veränderung; es ist allerdings zu betonen, daß dieser Versuch erst seit 1981 gezäunt ist und die Auswirkungen der seitdem sehr üppig aufgelaufenen Bodenvegetation erst noch abgewartet werden müssen. Auffallend für alle Meliorationsvarianten ist ein im Vergleich zu den Kontrollparzellen höherer Besatz an räuberisch lebenden Bodentieren; dieser spiegelt vermutlich die Aktivierung von Kleinzersetzern wider, worauf ja auch die Humusform hindeutet. Um die Leistungen der streuzersetzenden Mesofauna zu quantifizieren, führen wir z. Z. ergänzende mikromorphologische Untersuchungen durch.

3.2 Bodenchemische Eigenschaften

Die pH-Werte (Abb. 1) zeigen auf allen Meliorationsvarianten eine geminderte Azidität in den organischen Auflagen, abgestuft nach dem Ca-Eintrag durch Düngung. Eine deutliche Wirkung der Basenzufuhr auf die Reaktion des Mineralbodens ist dagegen nur noch bei WAL 234 und nur in der obersten Tiefenstufe nachzuweisen. Ähnlich reagierten die Gehalte an Gesamt-Ca, welche aus Raumgründen nicht dargestellt sind. Die Gesamtgehalte an P, K und Mg wurden durch die Meliorationsmaßnahmen nicht signifikant beeinflußt.

Ebenfalls weitgehend auf die organische Auflage beschränkt blieben die Effekte der Melioration auf die C- und N-Gehalte (Abb. 1). Erstere gingen – besonders auf der Lupinenvariante – durchweg zurück, während die N-Gehalte anstiegen; dies führte zu einer Einengung der C/N-Verhältnisse auf Werte um 30 (Kontrollen: um 36). Lediglich auf der Lupinenvariante WAL 234 ließen das zu Versuchsbeginn durchgeführte Einfräsen der Rohhumusauflage und die Meliorationswirkung der Lupine die C- und N-Gehalte im oberen Mineralbodenbereich ansteigen. Beobachtungen am Standort zeigen jedoch, daß in dieser Tiefenstufe die organische Substanz nicht homogen mit dem Mineralboden vermischt ist, da effektive Bodenwühler fehlen.

Tabelle 2: **Bioelementvorräte im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0–30 cm) der Versuchsglieder. Durchschnittswerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant**

	WAL 228			WAL 234		
	KON	KAS	KST	KON	VOLL	LUP
C t/ha	76.8 a	79.0 a	73.7 a	89.2 a	81.7 b	72.2 c
N kg/ha	3671 a	3969 b	3782 a	3668 a	3685 a	3386 b
P kg/ha	1940 a	2257 a	2084 a	1731 a	1687 a	1764 a
Ca kg/ha	917 a	1236 b	1470 c	2105 a	3574 b	2903 c

Die Humus- und Stickstoffvorräte (vgl. Tab. 2) erhöhten sich lediglich auf der Variante mit der geringsten Ca-Zufuhr (KAS, WAL 228). Die Volldüngung mit wiederholten Kalkammonsalpetergaben und höheren Ca-Mengen im Experiment WAL 234 führte dagegen zu einem leichten Humusabbau im Solum, ohne daß jedoch Stickstoffverluste auftraten. Aus dem Rahmen fällt die Variante „Lupinenunterbau" mit einem signifikanten Rückgang der Humus- und Stickstoffvorräte (−19 % bzw. −8 %). Die generell sehr niedrigen Ca-Vorräte der Böden waren auf allen meliorierten Versuchsgliedern deutlich erhöht.

Die Kationenbelegung der Austauscher im Mineralboden zeigt trotz der vergleichsweise geringen Baseneinträge selbst zwei Jahrzehnte nach Beginn der Versuche noch eine deutliche Reaktion (Abb. 2). Auf den Kontrollparzellen dominiert erwartungsgemäß Aluminium am Austauscher, und die Al-Sättigung steigt mit der Tiefe an. Die meliorativen Eingriffe erhöhten die Ca-Sättigung auf Kosten des Al; diese Zunahme schlägt im Gegensatz zu den pH-Werten bis 30 cm Tiefe durch, insbesondere bei WAL 234. Der Anstieg der Ca-Sättigung sowie der Ca/Al-Molverhältnisse ist im Exp. WAL 234 größer als im Exp. WAL 228 (vgl. die höheren Ca-Gaben). Die Einarbeitung des Kalks durch Fräsen ist auf der Lupinenvariante erkennbar. Fe und H+

Abb. 1: pH-Werte, Gehalte an organischem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff der Versuchsböden

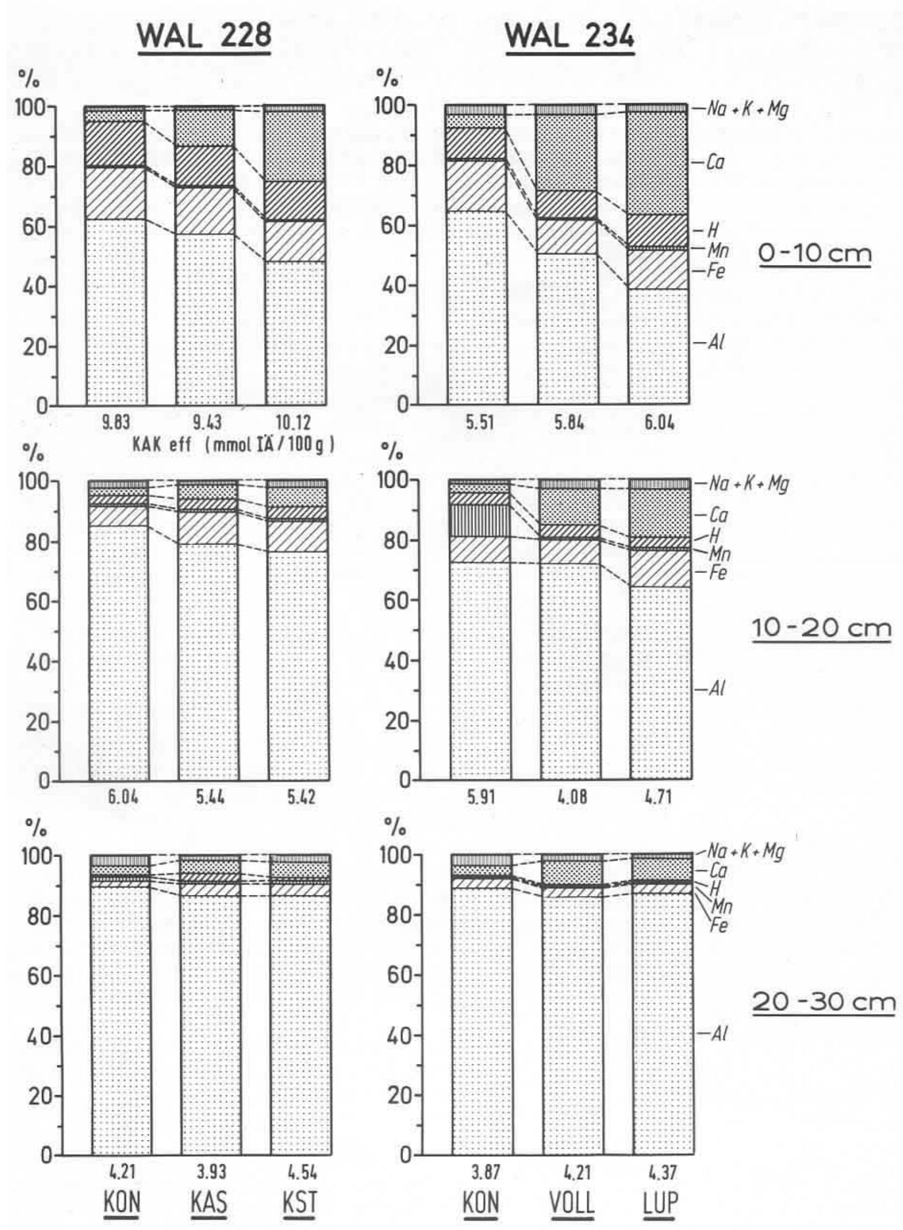


Abb. 2: Kennwerte der effektiven Kationenaustauschkapazität der Versuchsböden

erreichen auf den Kontrollvarianten in der obersten Mineralbodenlage eine Sättigung um 30 %. Diese geht in 20–30 cm Tiefe auf 3–4 % zurück; die Protonisierung der Austauscher liegt hier bei 1–2 %! Die Meliorationsmaßnahmen äußern sich in geringfügig verminderten Sättigungsgraden des Fe und H^+ im oberen Mineralboden und in der Tendenz zu leicht erhöhten Fe- und H^+-Anteilen an den Austauschern in den Tiefenstufen 10–30 cm. Die K- und Mg-Belegung liegt bei allen Substraten jeweils unter 1 %! Die Meliorationseingriffe erhöhten jedoch die sehr niedrigen Anteile von Mg an den Austauschern um 20–100 %.

Tabelle 3: **Vorräte an austauschbarem K, Ca, Mg und Al in organischer Auflage und Mineralboden (0–30 cm) der Versuchsflächen (in kmol IÄ/ha)**

		WAL 228			WAL 234		
		KON	KAS	KST	KON	VOLL	LUP
K	org. Aufl.	0.2	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3
	0–30 cm	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
	Gesamt	1.1	1.0	1.0	1.3	1.2	1.2
Ca	org. Aufl.	5.1	9.4	17.1	6.9	33.2	14.5
	0–30 cm	4.6	13.4	21.8	5.1	20.1	25.6
	Gesamt	9.7	22.8	38.9	12.0	53.3	40.1
Mg	org. Aufl.	0.7	0.9	0.9	1.9	2.3	1.4
	0–30 cm	0.8	1.2	1.1	0.5	0.8	0.9
	Gesamt	1.5	2.1	2.0	2.4	3.1	2.3
Al	org. Aufl.	4.3	4.2	3.4	8.0	1.2	0.8
	0–30 cm	120.1	117.6	105.4	109.8	91.0	88.6
	Gesamt	124.4	121.8	108.8	117.8	92.2	89.4

In deutlicher Abhängigkeit von der Höhe der verabreichten Ca-Menge verhalten sich die Vorräte an austauschbarem Ca in organischer Auflage und Mineralboden bis 30 cm Tiefe (vgl. Tab. 3); auch die Menge an austauschbarem Mg ist infolge der Meliorationsmaßnahmen etwas angestiegen. Die Vorräte an austauschbarem Al sind aber nur geringfügig vermindert.

Die positive Wirkung der Meliorationsmaßnahmen spiegelt sich auch in der Analyse der Gleichgewichtsbodenlösung und des 2:1-Wasserextraktes (Termin der Probenahme: April 1984) wider. Die Ca-Konzentrationen und die Ca/Al-Molverhältnisse stiegen in allen Fällen an (vgl. Tab. 4 bis 6). Auch die Mg-Gehalte in den Bodenlösungen nahmen in der Regel leicht zu. Auffallenderweise erhöhten sich in der GBL (nicht aber im 2:1-Wasserextrakt!) der obersten Mineralbodenlage nach Basenzufuhr auch die Al-Konzentrationen; dies führt zu kleineren Mg/Al-Quotienten. Die günstigen Meliorationswirkungen bestätigten sich auch bei Untersuchungen der Bodenlösungen im Sommer und Herbst 1984.

3.3 Bodenvegetation

Die Artenzusammensetzung der Bodenvegetation auf den Kontrollparzellen hatte sich, wie Vegetationsaufnahmen zeigen, seit Versuchsbeginn nicht geändert. Auf den meliorierten Versuchsgliedern hingegen waren die Zwergsträucher *(Vaccinium myrtillus, V. vitis-idaea, Calluna vulgaris)* und säuretolerante Moose und Flechten (z. B. *Dicranum undulatum, Leucobryum glaucum, Cladonia rangiferina, Cetraria islandica)* in wechselndem Ausmaß von Gräsern, dikotylen Kräutern, Farnen oder Himbeere abgelöst worden (vgl. Tab. 7). Auf der Lupinenvariante trat – vermutlich aufgrund anfänglicher Bodenbearbeitung – der stärkste Rückgang an Kryptogamen und Zwergsträuchern *(Vacc. myrtillus)* ein, bei gleichzeitig besonders intensiver Besiedelung mit dikotylen Kräutern und Farnen. *Calluna vulgaris* und *Vaccinium vitis-idaea* nehmen aber immer noch erstaunlich hohe Deckungsgrade ein. Die Lupine erreicht inzwischen nur mehr 10–15 % Deckung. Das Versuchsglied KAS WAL 228 mit geringster Ca-Zufuhr zeichnet sich durch relativ hohe Vergrasung mit *Deschampsia flexuosa* bei nur mäßigem Deckungsgrad an dikotylen Kräutern aus.

Die Kennwerte der Artenvielfalt in der Krautschicht wurden auf allen Meliorationsvarianten enorm verbessert; so stiegen die Artenzahlen um 250–400 % an! Bei den Neuankömmlingen handelt es sich um typische Vertreter von Schlagfluren (z. B. *Rubus idaeus, Senecio fuchsii, Epilobium angustifolium),* von reicheren Laubwäldern (z. B. *Dryopteris filix-mas, D. dilatata, Epilobium montanum, Moehringia trinervia),* nitrophilen Waldsäumen (z. B. *Mycelis muralis)* und Grünlandgesellschaften (z. B. *Taraxacum officinale).* Das Auftreten anspruchsvollerer Gefäßpflanzen und der Ausfall vieler azidophytischer Kryptogamen verdeutlichen die verbesserten Oberbodeneigenschaften nach Melioration (vgl. die ökologischen Zeigerwerte).

3.4 Wachstum und Ernährung der Kiefern

Neben den Wirkungen der Melioration auf Boden und Bodenvegetation interessiert auch die Reaktion der Kiefern hinsichtlich Wuchsleistung und Ernährungszustand. Bereits in der ersten Periode nach der Düngung antworteten die Versuchsglieder KAS und KST (WAL 228) sowie Volldüngung (WAL 234) mit einem Mehrzuwachs von 74, 36 und 52 % gegenüber den Kontrollbeständen. Ihre deutliche Überlegenheit hielt auch in den folgenden Meßzeiträumen an und ging nur in der letzten Periode etwas zurück (Tab. 8). Der Mehrzuwachs bis

Tabelle 4: **Chemische Kennwerte der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) der Versuchsböden im April 1984**

	Tiefe (cm)	WAL 228 KON	WAL 228 KAS	WAL 228 KST	WAL 234 KON	WAL 234 VOLL	WAL 234 LUP
ph-Wert	0–10	3.6	3.9	3.9	3.7	4.4	4.5
	10–20	4.2	4.5	4.5	4.5	4.8	4.8
	20–30	4.3	4.4	4.4	4.4	4.5	4.6
Al	0–10	5.3	16.9	15.6	7.0	24.6	21.0
mg/l	10–20	1.7	1.4	3.5	2.1	1.2	3.1
	20–30	2.8	1.9	2.1	2.1	1.1	1.2
Ca	0–10	4.2	14.4	15.5	3.9	15.4	14.9
mg/l	10–20	2.3	10.8	10.4	2.1	10.4	13.2
	20–30	2.9	6.1	9.3	2.2	8.4	10.5
Mg	0–10	1.1	1.6	1.8	1.4	1.7	1.9
mg/l	10–20	0.8	1.0	0.9	0.8	0.7	0.9
	20–30	0.5	0.6	0.4	0.5	0.4	0.7

Tabelle 5: **Chemische Kennwerte des 2:1-Wasserextraktes der Versuchsböden im April 1984**

	Tiefe (cm)	WAL 228 KON	WAL 228 KAS	WAL 228 KST	WAL 234 KON	WAL 234 VOLL	WAL 234 LUP
pH-Wert	0–10	3.2	3.4	3.4	3.3	3.6	3.6
	10–20	3.9	4.1	4.1	4.0	4.0	4.2
	20–30	4.2	4.2	4.3	4.2	4.4	4.3
Al	0–10	49.7	46.3	54.9	40.8	28.9	42.4
mg/l	10–20	22.0	22.0	21.7	17.7	13.1	14.0
	20–30	8.9	7.8	6.5	7.6	5.4	6.4
Ca	0–10	7.2	34.4	61.4	7.3	54.7	69.2
mg/l	10–20	2.2	16.4	13.5	2.1	15.4	20.3
	20–30	3.0	8.4	6.6	2.4	8.2	10.8
Mg	0–10	2.6	3.4	3.8	2.4	6.2	4.2
mg/l	10–20	1.0	1.5	1.5	1.0	1.1	1.3
	20–30	0.4	0.6	0.5	0.3	0.5	0.6

Tabelle 6: **Molverhältnisse von Ca/Al und Mg/Al am Austauscher, in der GBL und im 2:1-Wasserextrakt der Versuchsböden**

		Tiefe (cm)	WAL 228 KON	WAL 228 KAS	WAL 228 KST	WAL 234 KON	WAL 234 VOLL	WAL 234 LUP
austauschb. Kationen	mol Ca / mol Al	0–10	0.04	0.14	0.32	0.04	0.33	0.59
		10–20	0.02	0.04	0.06	0.03	0.11	0.16
		20–30	0.02	0.04	0.04	0.03	0.06	0.06
	mol Mg / mol Al	0–10	.006	.008	.010	.005	.010	.018
		10–20	.004	.005	.005	.002	.005	.007
		20–30	.004	.004	.006	.003	.003	.003
GBL	mol Ca / mol Al	0–10	0.53	0.57	0.67	0.38	0.42	0.48
		10–20	0.91	5.19	2.00	0.67	5.83	2.87
		20–30	0.70	2.16	2.98	0.71	5.14	5.89
	mol Mg / mol Al	0–10	0.23	0.11	0.13	0.22	0.08	0.10
		10–20	0.52	0.79	0.29	0.42	0.65	0.32
		20–30	0.20	0.35	0.21	0.26	0.40	0.65
2:1 WE	mol Ca / mol Al	0–10	0.10	0.50	0.75	0.12	1.27	1.10
		10–20	0.07	0.50	0.42	0.08	0.79	0.98
		20–30	0.23	0.72	0.68	0.21	1.02	1.14
	mol Mg / mol Al	0–10	0.06	0.08	0.08	0.07	0.24	0.11
		10–20	0.05	0.08	0.08	0.06	0.09	0.10
		20–30	0.05	0.09	0.09	0.04	0.10	0.10

1983 beträgt für KAS, KST und Volldüngung 89, 65 und 39 VfmS/ha, das entspricht einer Steigerung des Holzzuwachses von 57, 42 und 29 %! Diese Wuchsbeschleunigung ging seit Versuchsbeginn einher mit erhöhten Nadelspiegelwerten an N sowie (nicht immer signifikant) an P, Ca und Mg. Die schwächere Reaktion des Versuchsglieds „Volldüngung" (WAL 234) im Vergleich zu KAS und KST (WAL 228) beruht wahrscheinlich auf dem höheren Alter der Bestände.

Abweichend reagierte das Versuchsglied Lupinenunterbau (WAL 234). Hier konnte während der ersten beiden Beobachtungsperioden keine eindeutig verbesserte Wuchsleistung gegenüber der Kontrolle

Tabelle 7: **Einige flächenrepräsentativ erhobene Kennwerte der Bodenvegetation im Juli 1984**

Vegetationsparameter	WAL 228 KON	WAL 228 KAS	WAL 228 KST	WAL 234 KON	WAL 234 VOLL	WAL 234 LUP
Deckungsgrad versch. Wuchsformen in %:						
– Zwergsträucher	42	29	23	53	32	25
– „Grasartige"	<1	19	14	1	7	19
– dikot. Kräuter	0	20	39	0	36	52
– Farne	0	10	7	0	12	17
– Straucharten: Rubus idaeus	0	4	7	0	5	5
– Moose und Flechten	45	28	30	63	28	22
Artenvielfalt:						
– Artenzahl der Krautschicht	6	23	25	5	17	26
– Artendiversität der Krautschicht (Shannon-Wiener)	0.74	1.99	1.83	0.91	1.79	2.45
ökol. Zeigerwerte:						
– Mittlere Stickstoffzahl der Krautschicht (Ellenberg – qualitativ)	2.3	4.9	4.7	2.1	4.9	5.0
– Mittere Reaktionszahl der Krautschicht (Ellenberg – qualitativ)	1.8	3.1	3.3	1.7	3.2	3.6
– Kryptogamen stark saurer Waldböden (Präsenz in % aller Arten der Moosschicht)	67	44	43	70	41	36

festgestellt werden; diese stieg erst ab der dritten Periode deutlich an (Tab. 8). Der Gesamtzuwachs der mit Lupinen unterbauten Kiefern bleibt daher auch nach 19jähriger Laufzeit des Versuchs noch immer hinter jenem der vollgedüngten Vergleichsparzellen zurück. Die N- und P- Nadelspiegelwerte auf der Lupinenvariante verharrten anfangs ebenfalls auf dem Niveau der Kontrollkiefern, stiegen später jedoch an und übertrafen seit 1975 mehrfach die Gehalte der Kiefernnadeln auf dem Volldüngungsglied (Tab. 9) (vgl. KENNEL, 1967; KREUTZER, 1967; REHFUESS u. SCHMIDT, 1971; PREUHSLER u. REHFUESS, 1982; PREUHSLER et al., 1984; HÜSER pers. Mitteilung).

Tabelle 8: **Durchschnittlicher jährlicher laufender Zuwachs an Schaftholz (VfmS) in den Untersuchungsjahren (KENNEL, 1967; PREUHSLER und REHFUESS, 1982; PREUHSLER et al., 1984)**

WAL 228	Periode 1960–64 (4 Jahre)	1964–71 (7 Jahre)	1971–78 (7 Jahre)	1978–83 (5 Jahre)	x̄/Jahr (23 Jahre)
Kontrolle	4.72	6.45	7.42	8.18	6.82
KAS	8.22	11.28	11.02	11.36	10.69
KST	6.44	10.70	10.41	9.78	9.67

WAL 234	Periode 1964–67 (3 Jahre)	1967–69 (2 Jahre)	1969–74 (5 Jahre)	1974–78 (4 Jahre)	1978–83 (5 Jahre)	x̄/Jahr (19 Jahre)
Kontrolle	4.33	7.80	8.57	6.24	7.30	6.99
VOLL	6.57	11.60	9.97	9.84	7.98	9.05
LUP	4.17	8.23	10.22	9.48	8.72	8.50

Tabelle 9: **Nährelementgehalte halbjähriger Kiefernnadeln (mg/g Nadeltrockenmasse) im Untersuchungszeitraum 1974–1983. Durchschnittswerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (KREUTZER, 1967; REHFUESS und SCHMIDT, 1971; PREUHSLER und REHFUESS, 1982; HÜSER pers. Mitteilung)**

	WAL 228 (6 Untersuchungstermine) KON	KAS	KST	WAL 234 (10 Untersuchungstermine) KON	VOLL	LUP
N	14.8 a	17.5 b	17.5 b	14.4 a	15.9 b	16.5 b
P	1.58 a	1.70 a	1.71 a	1.60 a	1.72 b	1.80 b
K	6.10 a	5.89 a	5.97 a	5.97 a	5.70 a	5.73 a
Ca	2.09 a	2.27 a	2.42 a	2.13 a	2.69 b	2.74 b
Mg	0.71 a	0.78 a	0.74 a	0.65 a	0.72 a	0.73 a

4. Diskussion

Die Planung von Meliorationsmaßnahmen in derartigen Waldökosystemen mit dem Ziel, die Bodenfruchtbarkeit nachhaltig zu erhöhen und die Vitalität der Bestände zu fördern, hat unseres Erachtens folgende Kriterien zu berücksichtigen:

Art und Intensität der Eingriffe sollen schonend und auf das jeweilige Ökosystem zugeschnitten sein, um Schockwirkungen und nachteilige Langzeiteffekte auf die Lebewesen möglichst gering zu halten. So kann z. B. selbst bei mäßigen Kalkungen durchaus nicht immer nur eine Förderung der streuzersetzenden Bodenorganismen erwartet werden, wie BAATH et al. (1980) auf schwedischen Kalkungsflächen in Kiefernbeständen mit Rohhumusauflagen nachwiesen. Düngergaben sind der jeweiligen Ernährungssituation der Bäume anzupassen. Überhöhte Dosierung und einseitige Zusammensetzung können auf bestimmten Standorten eine disharmonische Ernährung auslösen (REHFUESS et al., 1983). Mykorrhizaschädigung ist ebenfalls nicht auszuschließen (FIEDLER et al., 1973).

Nährstoffverluste durch Auswaschung sind so gering wie möglich zu halten, um sowohl die in vielen Fällen geringen Nährstoffvorräte nicht weiter zu reduzieren als auch Grundwasserbelastungen auszuschließen. Sanierungsmaßnahmen mit hoher Nährstofffreisetzung infolge rapiden Humusabbaus müssen unbedingt vermieden werden. Eine weitgehende Einschleusung gedüngter oder mobilisierter Nährionen in den biologischen Kreislauf über die Nährelementaufnahme ist anzustreben. Wichtig sind daher eine produktive Bodenvegetation und ein Baumbestand, welche das verfügbare Nährstoffangebot auszunützen vermögen. Unter diesen Gesichtspunkten muß auch der Anbau von N-sammelnden Hilfspflanzen oder Erlen kritisch bewertet werden. Zum einen sind zur Begründung derartiger Kulturen i. d. R. kräftige Kalkung und Bodenbearbeitung notwendig, was zu Humusabbau führt. Zum anderen wird der gebundene Luftstickstoff bei intensiver Streuumsetzung häufig in Nitrat überführt, das bei ungenügender Aufnahme durch die Vegetation zusammen mit basischen Begleitkationen der Auswaschung unterliegen kann (vgl. KREUTZER, 1981). Dies bedeutet einen Versauerungsschub, welcher im ungünstigsten Fall die Größenordnung atmogener Säureeinträge weit übersteigt (van MIEGROET u. COLE, 1984), in vielen Fällen jedoch zumindest eine deutliche Basenverarmung an den Austauschern im Oberboden bewirkt (ULRICH, 1970; van MIEGROET u. COLE, 1984).

Die Auswertung der vorliegenden Meliorationsversuche auf den extrem sauren und gleichzeitig oxidreichen Phyllitböden zeigt, daß eine vorsichtig bemessene, wiederholte mineralische N-Düngung in Kombination mit einer mäßigen Ca-, P- und Mg-Zufuhr nicht nur die Streuumsetzung anregt, sondern auch die Nährelementaufnahme und die Wuchsleistung der Bestände rasch und nachhaltig fördert. Der Ernährungszustand der Kiefern wurde insbesondere für Stickstoff in den Bereich optimaler Versorgung gehoben. Dieser Effekt trat ein, obwohl in den letzten Jahrzehnten relativ hohe N-Einträge über die Niederschläge in die Wälder gelangten. Der harmonische Charakter der Düngung spiegelt sich auch in den durchwegs gestiegenen P-, Ca- und Mg-Gehalten der Kiefernnadeln wider.

Positiv hervorzuheben ist auch der erhöhte Anteil krautiger Pflanzen in der Bodenvegetation der gedüngten Versuchsglieder. Der N-, P-, Ca- und Mg-Kreislauf im Ökosystem wird besonders durch die dikotylen Kräuter intensiviert (vgl. RODENKIRCHEN, 1982). Deren hohe Produktion an leicht zersetzlicher Streu und der rasche Feinwurzelumsatz fördern vermutlich über die Stimulation der Bodenmikroorganismen den Abbau der Kiefernnadeln und die Neubildung wertvoller Huminstoffe.

Die Wirkung der Basenzufuhr auf den Boden zeigt sich zwei Jahrzehnte nach Beginn der Melioration in den pH-Werten nur noch in der organischen Auflage. Überraschend klar spiegeln sich die Eingriffe hingegen in der Austauscherbelegung sowie in der Bodenlösung wider. So führen selbst ganz geringe Baseneinträge (rund 800 kg Ca bei WAL 228 KAS) noch 23 Jahre nach Beginn des Versuches zu Ca-Sättigungswerten von mehr als 10 % im Oberboden. Obwohl die Ca-Dünger nur auf die organische Auflage aufgestreut wurden, ist die Basenwirkung an den Kennwerten der Kationenaustauschkapazität (KAK) und der Bodenlösung noch in Tiefen bis zu 30 cm abzulesen und dürfte sich auch noch darunter widerspiegeln. Diese Ergebnisse stehen den Befunden von ULRICH u. KEUFFEL (1970) entgegen, die eine Tiefenwirkung des Calciums nur nach Einarbeitung des Düngekalks feststellten.

Trotz geringer Mg-Düngung ist die Mg-Versorgung der Kiefern verbessert. Über ähnliche Erfahrungen von einem alten Düngungsversuch zu Fichten berichten KENK et al. (1984). Neben dem i. d. R. gestiegenen Mg-Angebot an den Austauschern und in der Bodenlösung dürfte auch eine verstärkte Nitraternährung dafür verantwortlich sein (KIRKBY, 1981; RODENKIRCHEN, 1984). Die K- wie die Mg-Belegung der Austauscher liegen auch in den meliorierten Substraten

noch unter 1 % und wären somit nach ULRICH et al. (1984) als völlig unzureichend einzustufen; dennoch sprechen die Nadelspiegelwerte für eine gute bis optimale K-Ernährung und eine zumindest mäßige Versorgung mit Mg!

Auch nach Melioration deuten viele bodenchemische Parameter, gemessen an den Postulaten von ULRICH et al. (1984), noch auf eine akute Gefährdung der Bestände durch Al-Toxizität hin. Alle Befunde sprechen jedoch eindeutig gegen toxische Effekte des reichlich vorhandenen mobilen Aluminiums auf die Wurzeln der Kiefern: Obwohl auf den meliorierten Parzellen nach Basenzufuhr die pH-Werte nur geringfügig anstiegen, die Vorräte an austauschbarem Al kaum zurückgingen (v. a. WAL 228) und die Al-Konzentrationen in der GBL nicht nennenswert abnahmen, sondern im Gegenteil in 0–10 cm Tiefe sogar noch anstiegen, reagierten Kiefern wie auch Bodenvegetation unerwartet stark auf die vorsichtig bemessene Nährstoffzufuhr. Eine Beurteilung des Meliorationserfolges vor allem nach dem Kriterium eines erhöhten pH-Wertes im Mineralboden scheint nach diesen Ergebnissen also nur bedingt möglich. Entscheidend ist nach allen unseren Erkenntnissen nicht die verringerte Aktivität des Al, sondern vielmehr das gesteigerte Angebot der im Minimum befindlichen Nährelemente N, Ca, Mg, (P). Ein deutliches Indiz hierfür sind die in allen Fällen erhöhten Ca/Al-Molverhältnisse in der Bodenlösung des Mineralbodens, deren Variation hauptsächlich durch die Ca-Konzentration gesteuert wird. Nachteilige Wirkungen des Al sind auf den Kontrollparzellen allenfalls insofern denkbar, als dort die Aufnahme des knappen Ca und Mg durch Ionenantagonismus des Al behindert wird. Negative Reaktionen des Baumbestands (z. B. Zuwachsdepressionen, irreversible Nadelverluste) oder der Bodenvegetation traten während 20 Jahren intensiver Beobachtung weder bei den schonend meliorierten Versuchsgliedern noch bei den Kontrollvarianten auf.

KRAMER und ULRICH (1985) halten nach Auswertung von Kalksteigerungsversuchen zu Fichte auf Syker Parabraunerden aus Sandlöß und auf podsoligen Braunerden aus Talsand Meliorationskalkungen mit Kalkmergel in Höhe von 20 dt CaO als völlig unzureichend. Sie begründen dies mit einer ihrer Meinung nach zu geringen Steigerung der Ca-Sättigung (diese wurde in einem Fall von 4 auf 10 %, bei 3 weiteren Flächen jedoch sogar auf 17–36 % angehoben) sowie einer nach wie vor zu hohen Austauscherbelegung mit starken Säuren (Fe und H^+). Beide Autoren diskutieren in diesem Zusammenhang die Freisetzung von Al, das Auftreten von toxischen Al-Konzentrationen in der Bodenlösung und damit die Gefahr von Feinwurzelschäden, ohne die Al-Sättigung der Austauscher und die Ca-, Mg- und Al-Konzentrationen in der Bodenlösung gemessen und ohne Feinwurzelmasse, -verteilung und -produktion studiert zu haben. KRAMER und ULRICH empfehlen deshalb Kalkungen von bis zu 60 dt CaO, obwohl in ihren Experimenten bei Kalk-Gaben >20 dt CaO nicht nur eine nennenswerte Steigerung der Gesamtwuchsleistung ausblieb, sondern in den Versuchen 151 und 159 auf Sandlöß in der höchsten Kalkstufe (60 dt CaO) sogar signifikante Zuwachsdepressionen auftraten. Da zudem die Probenahme im Gelände (nur 3 Entnahmepunkte pro Parzelle, nur eine einzige Entnahmetiefe bei 15 cm) und die Auswertung (nur Analyse der Gehalte, keine Elementvorratsbestimmung, keine Angaben über Al) zu extensiv erfolgten, halten wir die entsprechenden Empfehlungen von KRAMER und ULRICH für nicht gerechtfertigt. Pauschal veranschlagte hohe Kalkungen als Maßnahme zur Revitalisierung von Waldbeständen und zur Prophylaxe weiterer Versauerung, wie sie auch z. B. von BEESE und PRENZEL (1985) diskutiert werden, sind wegen nicht abzusehender negativer ökologischer Folgen abzulehnen.

Die bodenchemischen Veränderungen auf den durch alleinige Düngung meliorierten Parzellen der Waldsassener Versuche bewirkten trotz vorsichtiger Bemessung der Kalkgabe eine vollständige Umstimmung des Ökosystems bezüglich des Artenbestandes und der Produktivität der Vegetation, ohne daß gleichzeitig bedenkliche Nährstoffverluste aus dem Oberboden auftraten. Diese Meliorationsziele wurden, was besonders bemerkenswert ist, auch ohne die Ansiedlung mineralbodenaktiver Regenwürmer erreicht. Die Auswertung weiterer Versuche im Waldsassener Phyllitgebiet zeigt, daß selbst intensive Bodenbearbeitung, hohe Kalkung (100 dt $CaCO_3$/ha und mehr) zusammen mit dem Anbau von Weißerlen und anderen Laubbaumarten vorwiegend nur die säuretoleranten, auflageaktiven Regenwürmer förderten (MAKESCHIN, 1985). Gleichzeitig lösten diese massiven Eingriffe jedoch erhebliche Humus- und Stickstoffverluste und damit möglicherweise Grundwasserbelastungen aus (ERUZ et al., 1985).

Die Böden des Versuchsgliedes Lupinenunterbau in Exp. WAL 234 zeigen in ihren chemischen Kennwerten keinen deutlichen Vorteil gegenüber den gedüngten, aber nicht bodenbearbeiteten Vergleichsvarianten. Der Basensättigungsgrad in der obersten Mineralbodenlage ist zwar im Vergleich zum Versuchsglied Volldüngung wegen des Einfräsens von Düngekalk höher, doch beeinflußt dieser Unterschied weder die Zusammensetzung der GBL noch des Wasserextraktes entscheidend. Die Stickstoff- und Humusvorräte liegen dagegen selbst 19 Jahre nach Versuchsbeginn noch unter jenen der Kontrollvariante. Das Fräsen und die Grunddüngung zu Versuchsbeginn erhöhten offensichtlich durch rasche Humusmineralisierung das Stickstoffangebot über das Aufnahmevermögen der Kiefern und der Bodenvegetation hinaus, zumal deren Wurzelsystem anfänglich geschädigt war. Wahrscheinlich traten größere Nitratverluste durch Auswaschung (und Denitrifikation) auf, welche durch die N-Bindung der Lupinen bisher nicht wettgemacht werden konnten; einen Hinweis darauf sehen wir in der zum Untersuchungszeitpunkt weit vorangeschrittenen Verdrängung der Lupine durch eine üppige, artenreiche Konkurrenzvegetation. Die im Vergleich zur Volldüngung niedrigere Wiederfindungsrate für das Dünger-Ca spricht ebenfalls für einen hohen Nitrataustrag. Der mit Kalkung, Bodenbearbeitung und Lupinenunterbau verbundene Stickstoff- und Humusschwund sowie die beschleunigte Auswaschung von Ca aus dem Wurzelraum werden auch durch andere Autoren bestätigt (ULRICH, 1970; ULRICH u. KEUFFEL, 1970; SEIBT et al., 1977; HETSCH u. ULRICH, 1979).

Veranschlagt man im Untersuchungsgebiet eine jährliche Protonendeposition von 1 kmol/ha mit der Kronentraufe unter Kiefer, so entspricht dies einem Ca-Äquivalent von rund 20 kg Ca. Bei der bisherigen Laufzeit der Versuche von durchschnittlich 20 Jahren entspricht die Summe des Protoneneintrags demnach einem Äquivalent von 400 kg Ca. Somit waren auf dem Versuchsglied KAS WAL 228 mit der schwächsten Ca-Gabe etwa 50 %, auf den anderen meliorierten Varianten rund 20 % des gedüngten Ca zur Kompensation dieses Protoneneintrags verbraucht worden.

5. Empfehlungen für die Praxis

Wegen der bei Lupinenunterbau in vielen Fällen unvermeidlichen Humus- und Stickstoffverluste aus dem Boden, den anfänglichen Wurzelschäden (Fräsung) am stehenden Bestand (welche mit höherer Sturmgefährdung einhergeht) und der sich erst verzögert einstellenden Wuchsbeschleunigung halten wir eine Meliorationsdüngung ohne Bodenbearbeitung für das günstigste Meliorationsverfahren in Kiefernbaumhölzern auf Phyllit und anderen, sauren und devastierten Substraten.

Wir empfehlen eine sorgfältig bemessene, harmonische Düngung mit wiederholten Kalkammonsalpetergaben und mäßiger Ca-, Mg- und P-Zufuhr. Die Düngerdosierung und -zusammensetzung ist den spezifischen Bedingungen von Bestand und Standort (z. B. Bodenart, Art und Mächtigkeit des Auflagehumus) anzupassen. Das setzt eine intensive Ansprache der Standorte im Gelände sowie Nadel- und auch Bodenanalysen voraus. Mehrmalige Düngungen mit geringer Dosierung sind besser als einmalige hohe Gaben, da der Auflagehumus langsamer abgebaut wird. Hinsichtlich der N-Dosierung ist auf nicht streugenutzten Standorten Zurückhaltung geboten, da man mit erhöhten, anthropogen bedingten Stickstoffeinträgen rechnen muß. Hohe Kalkungen sind wegen der Gefahr von Humus- und Stickstoffverlusten und der damit verbundenen Nitratbelastung des Grundwassers abzulehnen. Bei der Dosierung von Kompensationskalkungen ist die Höhe des Säureeintrags zu berücksichtigen. Wir empfehlen auf sauren, devastierten Böden mit ungünstigem Auflagehumus langsam lösliche carbonatische Ca-Mg-Dünger.

6. Literatur:

BAATH, E., BERG, B., LOHM, U., LUNDGREN, B., LUNDKVIST, H., ROSSWALL, T., SÖDERSTRÖM, B., and WIREN, A., 1980: Effects of experimental acidification and liming on soil organisms and decomposition in a Scots Pine forest. Pedobiologia 20, 85–100. – BEESE, F., und PRENZEL, J., 1980: Wirkungen von Meliorationskalkungen auf das Verhalten von Ionen in einem Buchenwaldökosystem auf podsoliger Braunerde. Nationalpark Bayer. Wald. Schriftenreihe des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft Forsten. Wald und Wasser. In Druck. – ERUZ, E., MAKESCHIN, F., REHFUESS, K. E., und SCHULTE-ÜBBING, K., 1985: Auswirkungen von Vollumbruch, Kalkung und Weißerlenanbau auf die Bioelementvorräte eines ehemals streugenutzten Kiefernstandorts. Forstw. Cbl. 104, 8–22. – FIEDLER, H.-J., NEBE, W., und HOFFMANN, F., 1973: Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. Gustav Fischer, Stuttgart, 481 S. – GUSSONE, H. A., 1984: Die Praxis der Kalkung im Walde der Bundesrepublik Deutschland. Der Forst- und Holzwirt 38, 63–71. – HETSCH, W., und ULRICH, B., 1979: Die langfristige Auswirkung von Kalkung, Bodenbearbeitung und Dauerlupine auf die Bioelementvorräte zweier Flottsandstandorte im Staatl. Forstamt Syke. Forstw. Cbl. 98, 237–244. – HÜSER, R., 1983: Forstdüngung mit Blickrichtung auf die Immissionsbelastungen. AFZ 38 (41), 1089–1092. – HÜSER, R., und DUNKEL, I., 1985: Stoffdeposition durch Niederschläge in bayerischen Waldlandschaften. AFZ 40 (11), 280–282. – KENK, G., UNFRIED, P., EVERS, F. H., und HILDEBRAND, E. E., 1984: Düngung zur Minderung der neuartigen Waldschäden – Auswertungen eines alten Düngungsversuchs zu Fichte im Buntsandstein-Odenwald. Forstw. Cbl. 103, 307–320. – KIRKBY, E. A., 1981: Plant growth in relation to nitrogen supply. In: CLARK, F. E., and ROSSWALL, T. Terrestrial nitrogen cycles. Ecol. Bull. 33, 249–267. – KENNEL, R., 1967: Ertragskundliche Ergebnisse neuer Düngungsversuche in Kiefern-, Fichten- und Buchenbeständen Bayerns. Forstw. Cbl. 86, 13–28. – KRAMER, W., und ULRICH, B., 1985: Ergebnisse eines Kalksteigerungsversuchs im Forstamt Syke. Der Forst- und Holzwirt 40, 147–154. – KREUTZER, K., 1967: Ernährungszustand und Volumenzuwachs von Kiefernbeständen neuer Düngungsversuche in Bayern. Forstw. Cbl. 86, 28–53. – KREUTZER, K., 1981: Die Stoffbefrachtung des Sickerwassers in Waldbeständen. Mitt. Deutsch. Bodenkundl. Ges. 32, 273–286. – LAATSCH, W., 1957: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Waldbodenmelioration. Mitt. a. d. Staatsforstverw. Bayerns 29, 50–61. – MAKESCHIN, F., 1983: Bodenzoologische Ergebnisse eines Meliorationsversuches mit Weißerle auf einem ehemals streugenutzten Kiefernstandort. Mitt. Deutsch. Bodenk. Ges. 38, 343–348. – MAKESCHIN, F., 1985: Effects of amelioration procedures on lumbricids in acidic forest soils under Pinus sylvestris. Proc. 9th Int. Coll. Soil Zoology, Moskau, in Druck. – MAIER, U., 1983: Vegetations- und bodenkundliche Auswertung eines Meliorationsversuchs im Waldsassener Phyllitgebiet. Dipl.-Arbeit, Universität München. – MEIWES, K.-J., KÖNIG, N., KHANNA, P. K., PRENZEL, J., und ULRICH, B., 1984: Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben 7, 142 S. – van MIEGROET, H., and COLE, D. U., 1984: The impact of nitrification on soil acidification and cation leaching in a red alder ecosystem. J. Environ. Qual. 13, 586–590. – PREUHSLER, T., und REHFUESS, K. E., 1982: Über die Melioration degradierter Kiefernstandorte (Pinus syl. L.) in der Oberpfalz. Forstw. Cbl. 101, 388–407. – PREUHSLER, T., MAIER, F., und DÖRR, P., 1984: Exkursionsführer Kiefern-Düngungsversuche Pfaffenwinkel. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Universität München. – REHFUESS, K. E., 1981: Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Pareys Studientexte 29. – REHFUESS, K. E., und SCHMIDT, A., 1971: Die Wirkung von Lupinenunterbau und Kalkammonsalpeterdüngung auf den Ernährungszustand und den Zuwachs älterer Kiefernbestände in der Oberpfalz. Forstw. Cbl. 90, 237–259. – REHFUESS, K. E., BOSCH, C., and PFANNKUCH, E., 1983: Nutrient imbalancies in coniferous stands in Southern Germany. Communicationes Instituti Forestali Fenniae 116, 122–130. – RODENKIRCHEN, H., 1982: Wirkungen von Meliorationsmaßnahmen auf die Bodenvegetation eines ehemals streugenutzten Kieferstandorts in der Oberpfalz. Forstliche Forschungsberichte. München 53, 216 S. – RODENKIRCHEN, H., 1984: Vorräte und Nachlieferung an Mineralstickstoff im Boden eines Meliorationsexperiments zu Kiefer. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 147, 716–729. – SEIBT, G., 1977: Ergebnisse einiger Kalkdüngungsversuche in Nordwestdeutschland. Forstarchiv 48, 197–199. – SEIBT, G., WITTICH, W., und REEMTSMA, J. B., 1977: Ertragskundliche und bodenkundliche Ergebnisse langfristiger Kalkdüngungsversuche im nord- und westdeutschen Bergland. Schriftenr. Forstl. Fakultät Univ. Göttingen, Bd. 50, 298 S. – ULRICH, B., 1970: Die Reaktionen von Calciumcarbonat bei der Einarbeitung von Kalkmergel in stark versauerte Waldböden mit Auflagehumus. Allg. Forst.- u. Jagdztg. 141, 5–9. – ULRICH, B., und KEUFFEL, W., 1970: Auswirkungen einer Bestandeskalkung zu Fichte auf den Nährstoffhaushalt des Bodens. Forstarchiv 41, 30–35. – ULRICH, B., und MATZNER, E., 1983: Neuere Erkenntnisse aus dem Problemkreis Düngung im Wald. AFZ 38 (16), 392–393. – ULRICH, B., MEIWES, K. J., KÖNIG, N., und KHANNA, P, K., 1984: Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldböden. Der Forst- und Holzwirt 39, 278–286. – VÖLKL, J., 1982: Bodenkundliche Auswertung eines Meliorationsversuchs zu Kiefer auf Phyllit im Forstamt Waldsassen/Opf. Dipl.-Arbeit Universität München. – WEHRMANN, J., 1959: Die Mineralstoffernährung von Kiefernbeständen (Pinus sylvestris) in Bayern. Forstw. Cbl. 78, 129–149.

Danksagung

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft und die Bayer. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (Projekt B 41) haben die Untersuchungen gefördert. Der Amtsvorstand und das Personal des Forstamts Waldsassen unterstützten immer wohlwollend die Arbeiten im Gelände. Unser Dank gilt auch den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Bodenkunde, die bei den Gelände- und Laborarbeiten engagiert mithalfen.

Prof. Dr. K. E. REHFUESS ist Inhaber des Lehrstuhls für Bodenkunde der Universität München; Dr. F. MAKESCHIN, S. FRANCKE und Dr. H. RODENKIRCHEN sind wissenschaftliche Mitarbeiter an diesem Lehrstuhl; U. MAIER und J. VÖLKL waren als Diplomanden tätig.